

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04068

研究課題名(和文)六自由度ランダム振動と熱衝撃を受けるマイクロ接合構造の強度信頼性

研究課題名(英文)Structural reliability of micro joints subjected to six degrees of freedom random vibration and thermal shock

研究代表者

澁谷 忠弘 (Shibutan, Tadahiro)

横浜国立大学・先端科学高等研究院・教授

研究者番号：10332644

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、温度制御槽を具備する六軸ランダム振動試験装置を用いて、マイクロ接合構造の多軸ランダム振動に対する破壊挙動を予測するための手法を確立することを目的としている。実耐熱性樹脂の密着性評価手法の高度化を目的として、有限要素解析ソフトを用いた応力シミュレーションを実施した。Cohesive Zone Model(CZM)モデルを用いた界面のエネルギー解放率推定により定量的な界面強度評価が可能となった。HALT試験装置を用いて振動試験を行うとともに、時刻歴応答解析により試験片に生じる応力評価を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実環境での破壊事故事例の多くは、振動と温度変化に起因したものであり、両者の複合負荷状態での損傷挙動は重要な課題の一つである。ランダム振動と温度変化に起因した熱変形の相互作用については、近年複合環境試験装置などで一部検討されている。しかし、多くが振動挙動を単軸にした場合が多いため、単純な損傷の重ね合わせで議論される場合が多く、評価方法も十分に体系化されていない。今回、界面のはく離挙動を考慮した評価モデルを構築することで、温度と機械的負荷を受けるマイクロ接合部の信頼性向上に貢献した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to establish a method for predicting the fracture behavior of a micro joints subjected to multi-axis random vibration using a six-axis random vibration with a thermal shock. The stress simulation using finite element analysis software was carried out for the purpose of improving the adhesion evaluation method of the actual heat-resistant resin. Quantitative interface strength evaluation has become possible by estimating the energy release rate of the interface using the Cohesive Zone Model (CZM) model. A vibration test was performed using a HALT test device, and the stress generated in the test piece was evaluated by time history response analysis.

研究分野：材料強度学

キーワード：構造信頼性 接合強度

1 . 研究開始当初の背景

近年、技術システムが複雑化かつ大規模であることに起因して、従来の信頼性工学に基づくアプローチが限界に達している。製品の信頼性は、米国 MIL 規格に代表される信頼性試験規格や民間団体のガイドラインに基づき評価されてきた。信頼性試験では、想定される故障モードを対象に、より厳しい環境条件で実施される寿命加速試験であり、市場での使用期間中に不具合を起こさないようにすることが目的である。しかし、近年多くのエレクトロニクス製品では、加速試験では想定しない故障モードによる不具合が報告されており、場合によっては社会の安全性を脅かすような社会問題に発展するケースも存在している。

小型化、集積化が進むエレクトロニクスにおいて、マイクロ接合構造の構造強度は主要な故障モードの一つである。金属、セラミクス、樹脂の複合構造となるマイクロ接合構造では、複数の界面が存在しており、破壊の起点となりやすい。とくに、近年パワーモジュールの大電流化などに起因して樹脂 - 金属、樹脂 - セラミクス界面の強度信頼性がボトルネックとなっている。とくに、樹脂接合構造、プロセスの不均一性が高く、強度信頼性予測が難しい。

実環境における破壊を正確に予測することは、容易ではない。実環境の負荷は多様であり、複数の破壊モードが相互作用をもたらしつつ同時に進行する。これまで、学術的にも単一の破壊モードについては精緻な検討が行われてきた。しかし、複数の破壊モードが相互作用を伴いながら進行するマルチ破壊モードについては、学術的に十分な体系化がなされていない。

マイクロ接合構造では、異なる材料間の変形の不マッチに起因した熱疲労を主要な破壊モードとした強度評価が数多く行われている。熱疲労では、異なる材料の線膨張係数の不マッチと材料の反り変形に起因してせん断応力や接合部に垂直な応力が発生する。このとき、主応力方向は大きく変化しないため、比例負荷状態として相当応力や相当ひずみにより整理される。しかし、近年エレクトロニクス化が著しい車載環境等に代表されるように、過酷な熱と振動環境に晒される場合、接合部には、構造サイズが微小であることに起因して六自由度の負荷を受ける。このとき、負荷条件によって主応力状態が異なる非比例負荷状態での疲労損傷評価が必要となる。非比例負荷による材料の破壊については、いくつか限定的な条件下で研究例はあるものの、ランダム振動のような条件下での精密な評価はほとんど行われていない。

2 . 研究の目的

本研究は、温度制御槽 (-100 ~ 200) を具備する六軸ランダム振動 (~ 75Grms, Grms は、加速度スペクトルの二乗平均平方根) 試験装置を用いて、マイクロ接合構造の多軸ランダム振動に対する破壊挙動を予測するための手法を確立することを目的としている。

多軸ランダム振動による主要な破壊モードは疲労であり、これまでに多くの研究が行われている。しかし、多軸ランダム振動による疲労破壊については、体系的な検討は少ない。また、試験装置は複数のアクチュエータなどにより大型化する場合が多く、温度制御も具備した装置は少ない。本研究では、申請者が所属する横浜国立大学に導入された高加速限界試験装置 (Highly Accelerated Limit Test, HALT) を用いて、温度制御状態での六自由度ランダム振動による損傷挙動の解明に取り組む。HALT は、製品の脆弱性を検出するための試験方法であり、六自由度振動を付与する振動台と温度槽で構成される。振動台下部より複数のハンマリング型加振装置を制御することで六自由度の加速度を負荷することができるため、比較的高い周波数 (~ 5000 Hz) を含むランダム振動を発生させることができる。マイクロ接合構造は、樹脂、金属、セラミクス等幅広い材料で構成される。とくに、剛性の高い材料を含む場合には、接合部の固有振動数が高くなる場合も多いため、高周波まで負荷できる本装置は有効である。

3 . 研究の方法

本研究では、樹脂材料と金属で構成されるマイクロ接合構造を対象とした。近年、SiC 等の大電流モジュールなどでは、材料の耐熱化が主要な課題となっており、封止樹脂材料などの耐熱性が相対的に低い材料の信頼性が課題となっている。樹脂 - 金属接合部と樹脂材料の耐熱性に着目して、六自由度ランダム振動試験を実施した。樹脂のガラス転移点近傍に近い高温環境で試験を実施して温度依存性を抽出するとともに、ランダム振動と温度変化を同時に付与した複合試験も実施して、損傷挙動の予測を行なった。

4 . 研究成果

耐熱性樹脂の密着性評価手法の高度化を目的として、有限要素解析ソフトを用いた応力シミュレーションを実施した。はく離挙動を再現するため、Cohesive Zone (CZM) Model を用いた。まず、機械的せん断密着強度試験の一つであるプリンカップ試験を対象に、CZM 要素のパラメータを同定するため、パラメトリック解析を実施して、実験値に近い結果となるパラメータの同定を試みた (図 1)。プリンカップ試験解析では、はく離発生時の界面ははく離進展挙動をうまく表現しており、はく離発生時に一旦荷重は低下して、その後ははく離進展とともに荷重は増大していた。密着面の約半分まではく離領域が達した段階で不安定なはく離が発生しており、その時点で

最大荷重を示している。量子化学計算から推定される値と比較すると、高い値となった。これは、アンカー効果などマイクロ形状の影響が大きいと推定される。加えて、樹脂と銅基板で構成される簡易パッケージモデルを対象に熱応力解析を行うことで、同定したパラメータの妥当性について検討した(図2)。簡易パッケージモデルの解析では、樹脂成型時と温度サイクル負荷時の2種類について解析を実施した。プリンカップで得られたパラメータを用いたCZM要素は、はく離挙動をうまく再現したが、パラメータによってははく離進展挙動が異なる。これは、線膨張係数差に起因して発生する界面でのミスマッチに起因している。パラメータの同定には、SATによる観察結果や樹脂と金属界面での接合状態を考慮する必要があることが明らかとなった。

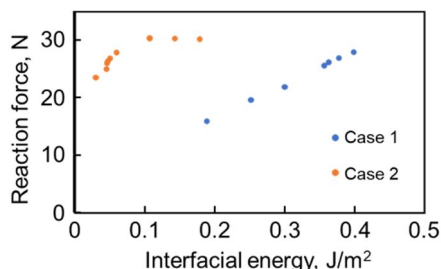


図1 界面エネルギーの推定

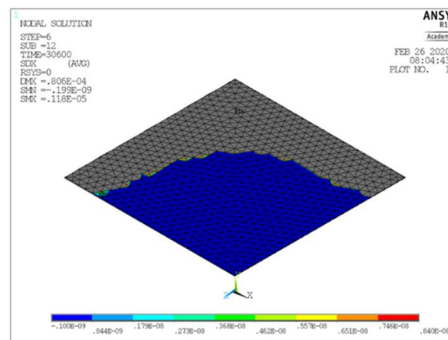


図2 界面はく離進展挙動

振動実験の条件設定を目的としたプリンカップ試験片を対象に拘束条件を変えてモード解析を行い、固有振動数及び変形モードについて確認した。試験機の周波数範囲である10-5000Hzで生じる変形モードについて検討した結果、片持ちはりの条件が曲げ変形とねじり変形のモードが生じ、最も応力が発生しやすい条件であったことが確認された。

HALT試験機(Qualmark社製Typhoon2.5)を用いて、前述のプリンカップ試験片を対象として、のランダム振動を試験体に与える振動強度試験を行った(図3)。モーダル解析によって決定した試験体の固定方法を再現するため、固定には、金属基板上に直方体の金属が接着されたものを利用した。固定部材の材質はSS400である。試験体を金属用接着剤で取り付け、基板の四隅を固定用ボルトでHALT装置に取り付けた。また、直方体の金属の上に加速度計を設置した。加速度計はQualmark社製加速度ピックアップ300-0024を使用した。振動条件は、10Gから60Gまで10分ごとに10Grmsずつ増加させた。

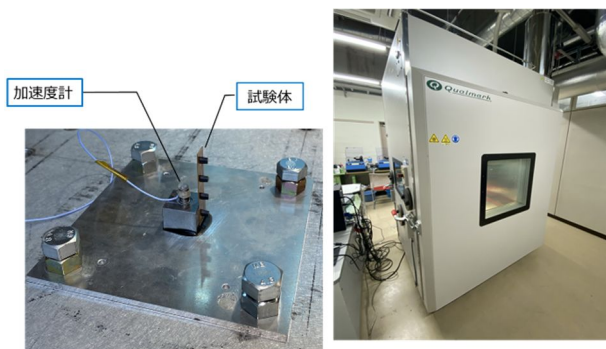


図3 HALT試験

試験では、目視によるはく離は確認できなかったため、より詳細な検討の為、時刻歴応答解析を行い、界面に作用する応力を評価した。実験で測定した加速度のデータをX,Y,Z成分に当てはめることでHALT試験のランダム振動を再現した。ランダム振動を与えた時の時間の変化における樹脂と密着面における応力の変化を解析し、密着面法線方向の最大応力を求めた。界面強度に比べて発生している応力が小さく、はく離を生じさせるためにはより低強度の試験体を使用するか、エッチングなどにより応力集中部を意図的に作製する必要があることが確認された。

上記の成果を統合し、マイクロ接合構造の多軸ランダム振動に対する破壊挙動を予測するための手法について整理を行った。CZMモデルを用いることで複雑な構造においても定量的に界面強度を推定することが可能となっており、六自由度振動による挙動にも適用が可能であることが確認できた。今後は、樹脂のフィラー材などの不均一性を考慮したより精密なモデルの構築が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------